

橋梁等構造物に入射する津波の時系列波形に対する分析と 類型化

庄司学¹・中村友治²・高橋和慎³・清水裕文⁴

¹正会員 博(工) 筑波大学准教授 システム情報系 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1)

²学生会員 筑波大学 システム情報工学研究科 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1)

³学生会員 修(工) 筑波大学 システム情報工学研究科 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1)

⁴学生会員 筑波大学 システム情報工学研究科 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1)

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震 ($M_w = 9.0$)では、東日本沿岸の広域に及ぶ橋梁等構造物が津波作用を受け、その多くが被災した。橋梁機能の損失は道路ネットワークの寸断に直結し防災直後の救援・復旧活動に甚大な影響を及ぼす。そのため、例えば文献1)においても指摘されているように、それらの物理的被害を引き起こし得る津波の波形的な特徴を把握し、津波作用と橋梁等構造物の損傷の関係を明らかにすることは重要である。

東北地方の太平洋沖合で発生した津波が伝播しながら東日本沿岸部に到達し、陸域を遡上する過程を明らかにすることを目的として、数値解析や映像解析に基づく分析がこれまで数多く行われている。沖合での津波の伝播に関しては、河合ら²⁾は全国港湾海洋波浪情報網NOWPHASで運用するGPS波浪計、沿岸波浪計及び潮位計により観測された時系列水位データを解析し、最大水位到達までの水位変化の特徴を分析している。このように得られた津波波高の実測データを基に、Fujii *et al.*³⁾は津波インバージョン解析により津波波源モデルを推定・提案し、このモデルを用いた数値解析により得られる水位波形と観測波形との比較を行った。さらに、今村ら⁴⁾は東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループにより観測された痕跡高さデータ⁵⁾及び国土地理院で公開する津波浸水域に整合する形で断層すべり量を修正し、自らの津波波源モデル(東北大学モデル version1.2)を提案している。

沖合から沿岸までの津波の伝播過程に関しては、先述した断層モデル等を初期条件とした津波シミュレーションに基づく検証が行われており、岩手県北

部沿岸⁶⁾を始めとして、宮城県の釜石湾⁷⁾、牡鹿半島地域⁸⁾及び仙台平野の名取川河口地域⁹⁾、福島県中部沿岸¹⁰⁾及び茨城県沿岸¹¹⁾を対象とした数値解析が多数行われている。

海岸線から陸域を遡上する津波を対象とした研究事例としては、林・越村¹²⁾は仙台平野を遡上する津波の空撮映像を解析することで、遡上速度及び流速を推定し、それらと数値計算結果を比較することで津波シミュレーションの再現性を確認している。久木田・柴山¹³⁾は、宮城県気仙沼市に襲った津波の映像を解析して水位変化及び流速を推定し、同様に数値計算結果との比較を行っている。さらに、茅根ら¹⁴⁾は宮城県の北上川等の河川を津波が遡上した際の河川水位データ及び河川堤防に残された津波痕跡高情報を分析し、河床勾配と遡上距離の関係を明らかにするなど、津波の伝播・遡上に関わる地形の影響について考察している。また、佐々木ら¹⁵⁾は岩手県及び宮城県沿岸を遡上する津波の映像から流速を推定し、橋梁に及ぼす津波の作用力を分析している。

以上を踏まえ本研究では、東北地方太平洋沖地震において津波作用を受けた桁橋構造の橋梁を対象に津波シミュレーションを行い、浸水高の時系列波形の類型化を行うとともに、津波伝播における海域勾配及び陸域勾配との関係を分析する。

2. 分析対象データと分析方法

(1) 分析対象データ

本研究では、庄司ら¹⁶⁾で示された、東北地方太平洋沖地震津波で津波作用を受けたとされる橋梁等構造物から144の桁橋に焦点を当てる。これらの対象

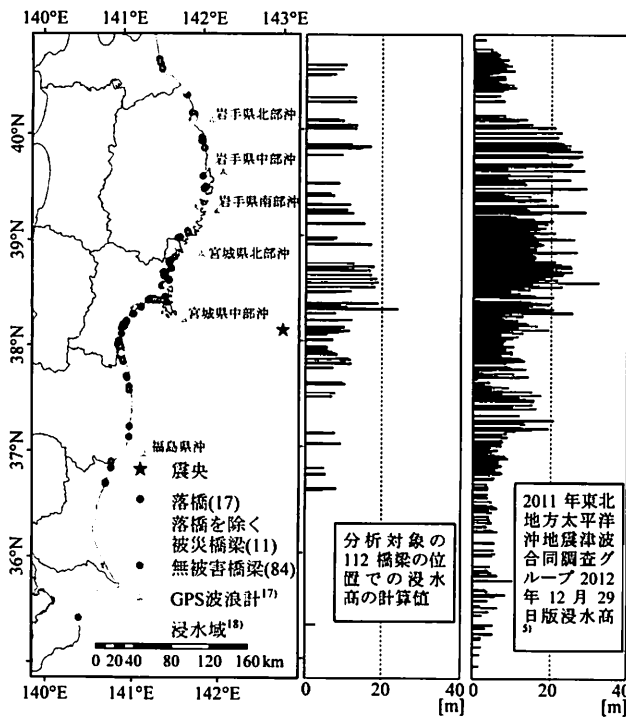


図-1 分析橋梁と計算及び観測された浸水高

橋梁に入射する津波の時系列波形は次節で示す津波シミュレーションによって計算し、計算精度が確保された112橋梁において分析を行う。対象とした112橋梁と計算及び観測された浸水高の空間分布を図-1に示す。

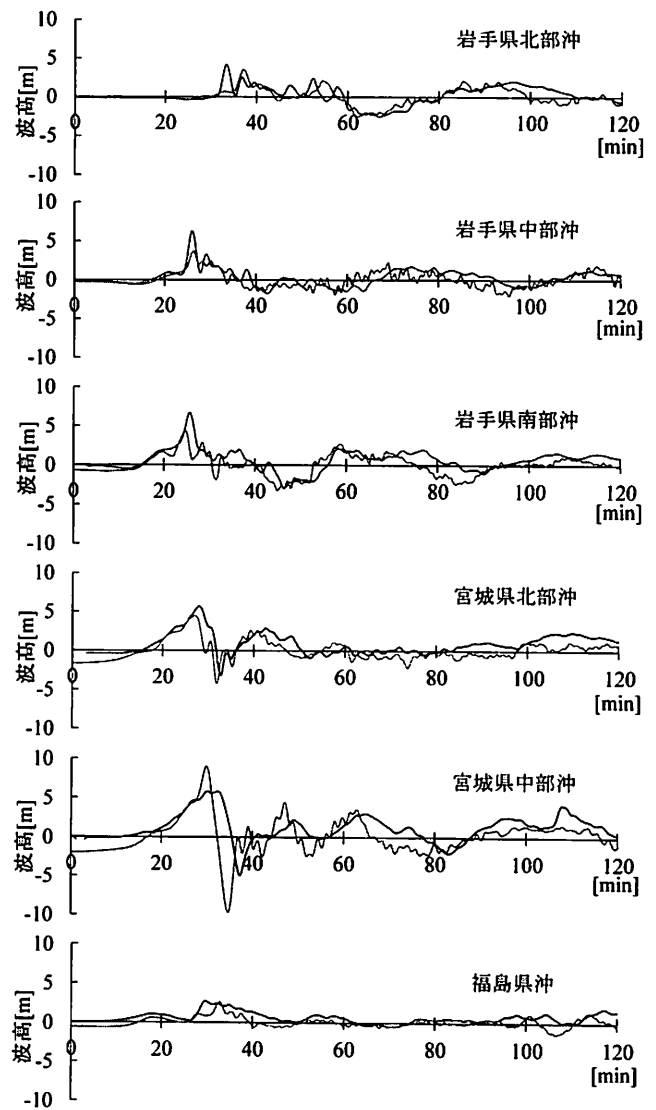
(2) 津波シミュレーション

東北大学により開発された津波プログラム TUNAMI-CODE (Tohoku University's Numerical Model for Investigation of Tsunami)¹⁹⁾を用いた津波の伝播及び浸水に関する数値シミュレーションにより浸水高を計算する。支配方程式は浅水理論による以下の式(1)に基づき、格子配列としてはStaggered格子を採用し leap-frog 差分法で計算を実施した。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (1a)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) \\ = -gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{gn^2}{D^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} \end{aligned} \quad (1b)$$

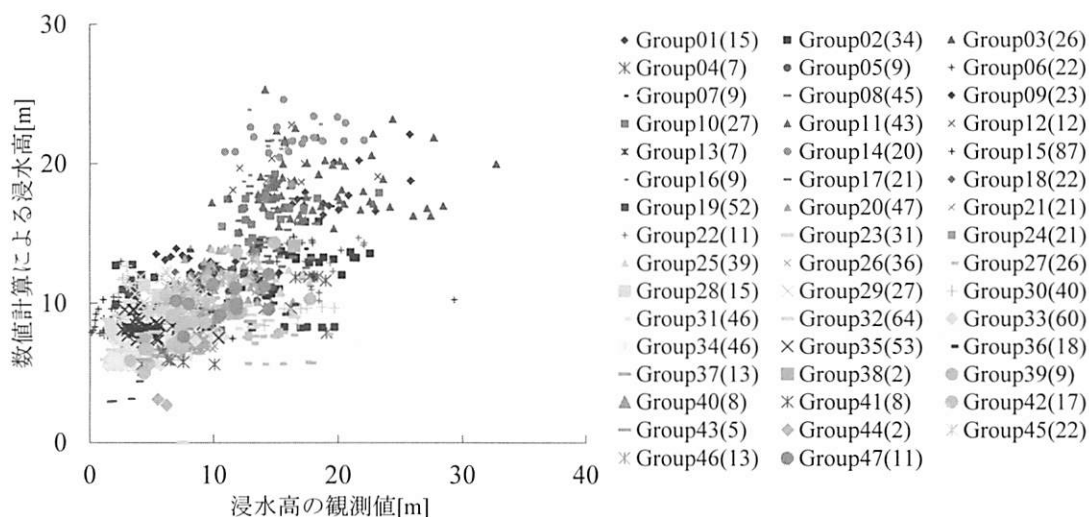
$$\begin{aligned} \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) \\ = -gD \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{gn^2}{D^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} \end{aligned} \quad (1c)$$



赤線：GPS波浪計，青線：計算値

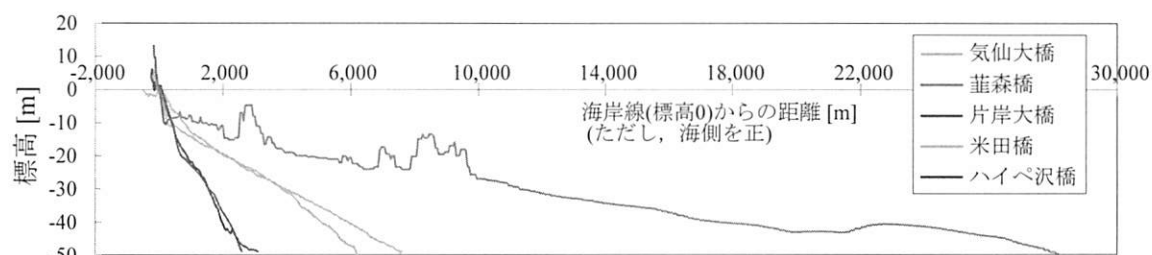
図-2 GPS波浪計及び計算による波高の比較

ここで η は津波波高、 M と N は x, y 方向の流量フラックス、 $D(=\eta+h)$ は全水深、 h は静水深である。なお、Manningの粗度係数は全計算で一様に0.025とした。数値計算は112の対象橋梁を47の計算Groupに分割し、それぞれにおいて計算領域を広域(Region1)から狭域(Region6)まで6段階に設定した。標高及び水深データについては、陸域の広域4領域ではGEBCO30(General Bathymetry Chart of the Oceans 30s Gridded bathymetry data)のデータ、陸域の狭域2領域では国土地理院提供の数値標高モデル(10mDEM)である。海域の広域1領域ではGEBCO30のデータ、海域の狭域5領域では日本水路協会の海底地形デジタルデータM7000シリーズを利用した。各領域でこれらのデータをKriging法で補間した。波源モデルはFujii et al.³⁾によるものを利用し、初期水位はOkada²⁰⁾の方法により静的に与える。座標系はWGS-1984-

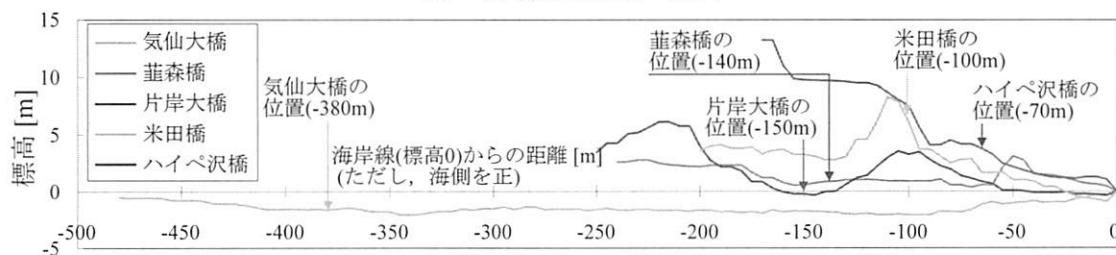


注：括弧内は各Groupで比較した観測点の数

図-3 浸水高の計算値と観測値との比較



(a) 海域及び陸域の標高



(b) 陸域の標高と橋梁の位置

図-4 対象橋梁から水深50m地点までの標高

UTM-54-Nを用いた。計算時間は刻み幅0.10秒で総計算時間は120分から240分とした。

このように計算された津波シミュレーションの妥当性の評価を行う。まず、6基のGPS波浪計による津波の観測値と津波シミュレーションによる計算による波高の比較を行い、図-2に示す。また、比較を行ったGPS波浪計の位置は図-1に示す。なお、図-2に示す時系列波形については海岸線から沖合にかけての領域に入射する波のリファレンスを示している。

次に図-3には浸水高の実測地点における数値計算の結果と観測値との関係を示す。津波シミュレーションの妥当性評価については観測点*i*に対して浸水高の観測値 R_i の計算値 H_i に対する比を K_i と定義した上で、以下の式(2)によって得られる対数平均 K と対

数標準偏差 κ を指標として評価できる²¹⁾。

$$\log K = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \log K_i \quad (2a)$$

$$\log \kappa = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\log K_i)^2 - (\log K)^2} \quad (2b)$$

ここで n は観測点の総数である。これら指標を用いて、各計算領域において浸水高の計算値と橋梁の近傍に存在する1,201点での浸水高の観測値⁵⁾と比較した。その結果、観測点における平均的な補正倍率を表す K は0.896、各観測点での K_i の平均値 K に対する

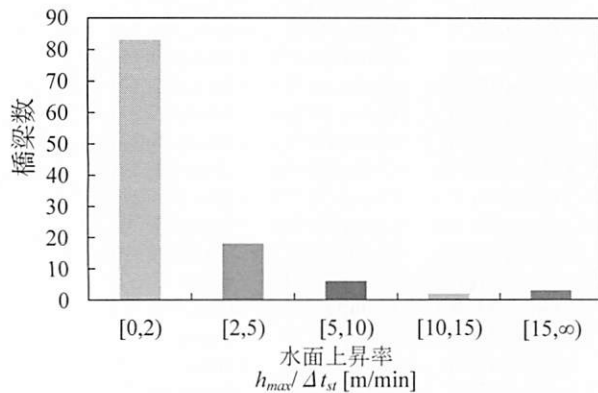


図-5 水面上昇率毎の橋梁数

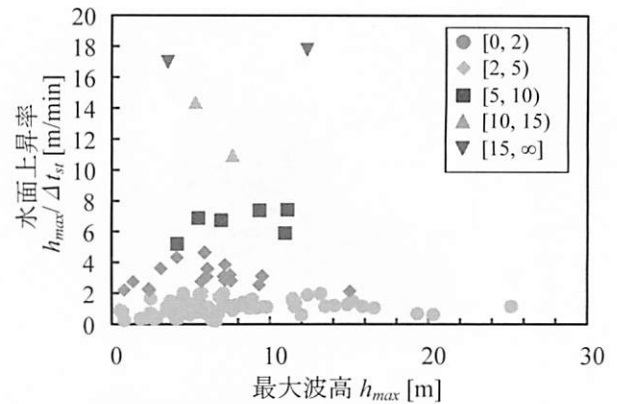


図-6 水面上昇率と最大波高の関係

変動の割合を表す κ は1.215となった。これらは共に1に近いほど精度が良いとされ、相田²²⁾は K が0.92、 κ が1.2となる津波波源モデルが精度良く実際の津波の伝播及び浸水を再現するモデルとしている。この比較検討に基づき、各橋梁地点での数値計算の結果がそれぞれの地点での浸水高として妥当であると考え、以降の分析にこれらの津波シミュレーションによる計算値を用いる。

(3) 海域及び陸域の標高勾配の算出

海域及び陸域の標高勾配(以下、海域勾配及び陸域勾配)については、陸域では国土地理院提供の数値標高モデル(5mDEM)、海域では津波シミュレーションで使用したRegion3~4の地形データをそれぞれ使用し、各グリッドにおいてNS方向とEW方向の標高勾配の二乗和平方根で最大勾配を定義した。なお、陸域において橋梁周辺の5mDEMが存在しない9橋梁においては震災前の10mDEMを使用した。河川上に存在する対象橋梁では河川に沿って対象橋梁から海岸線までの最大勾配の平均値、跨線橋においては各橋梁から最近傍の海岸線までの最大勾配の平均値をそれぞれ平均陸域勾配と定義し、これを海岸線の極近傍に位置する5橋梁を除いた計107橋梁で算出した。なお、海岸線は標高0 mと定義している。対象橋梁と最近傍の海岸線から海底勾配の影響を受けて津波が非線形化すると考えられるおよそ水深50m²³⁾となる海域までの最大勾配の平均値を平均海域勾配と定義し、全112橋梁の対象橋梁に関わる領域で算出した。図-4には次章で取り上げる代表的な橋梁位置から水深50mとなる地点までの標高の断面図を示す。

3. 時系列波形の分析と類型化

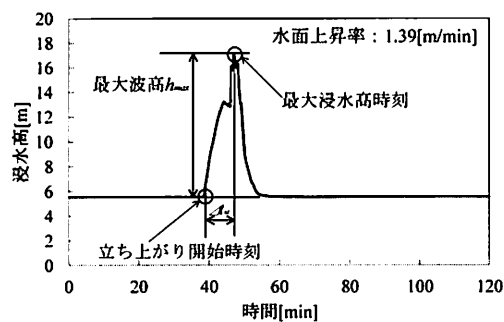
(1) 時系列波形の類型化

各橋梁地点の波形の特徴に基づき、類型化する際に使用するパラメータ $\Delta t_{st}, h_{max}$ を定義する。ここで Δt_{st} は最大波の立ち上がり開始時刻から最大浸水高を記録した時刻までの時間である。また、 h_{max} は最大浸水高から初期の河川水面標高を差し引いたものであり、以降で最大波高と定義する。このように定義した h_{max} を Δt_{st} で除すことにより水面上昇率 $h_{max}/\Delta t_{st}$ と定義した上で112橋梁での時系列波形の類型化を行った。水面上昇率のヒストグラムを図-5に示す。

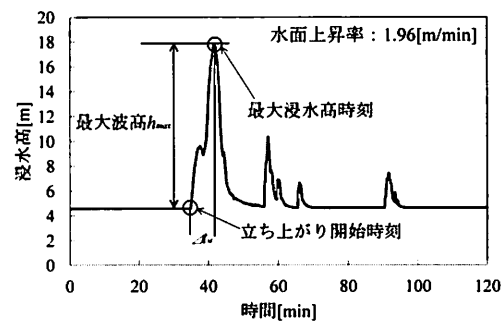
水面上昇率2.0 m/min未満に83橋梁、2.0 m/min以上5.0 m/min未満に18橋梁、5.0 m/min以上10 m/min未満に6橋梁、10 m/min以上15 m/min未満に2橋梁、15 m/min以上に3橋梁となった。これより、74%の橋梁が2 m/min未満の領域に存在した。図-6に水面上昇率と最大波高の関係を示す。また、図-7には代表的な橋梁位置における時系列波形を示す。

(2) 平均海域勾配及び平均陸域勾配と水面上昇率の関係

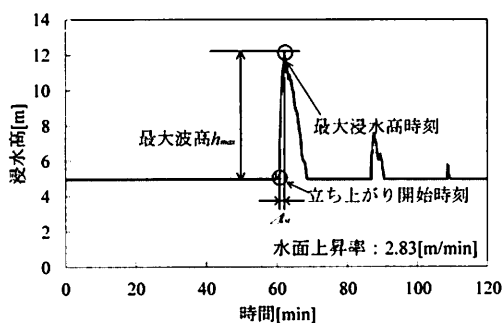
平均海域勾配並びに平均陸域勾配と水面上昇率との関係を図-8に示す。図-8(a)に示すように、平均海域勾配は0.0015 radから0.0681 radの間の値を示しており、平均海域勾配が大きくなるに従い水面上昇率も大きな値を示す傾向となる。2 m/min未満の水面上昇率を示す橋梁の平均海域勾配は0.0015 radから0.0681 radの間と最も広い区間を示し、同様に2 m/min以上5 m/min未満の水面上昇率を示す橋梁でも平均海域勾配は0.0016 radから0.0289 radの間の値を示した。水面上昇率が5 m/min以上10 m/min未満に高まると平均海域勾配が0.0095 radから0.0324 radの間



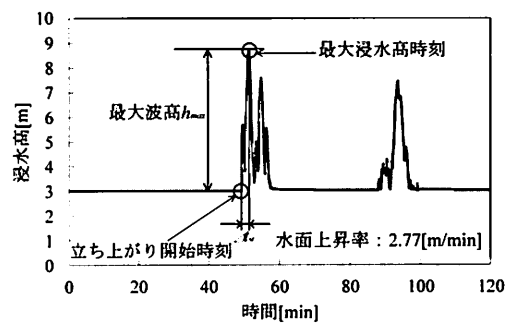
(a) 気仙大橋



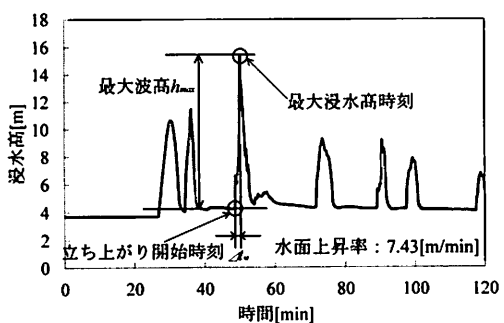
(b) 無被害橋梁(宮城県気仙沼市本吉町大沢地区)



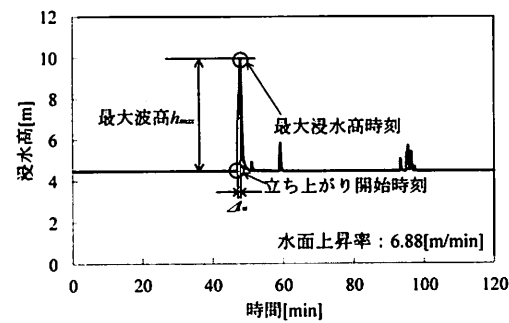
(c) 韮森橋



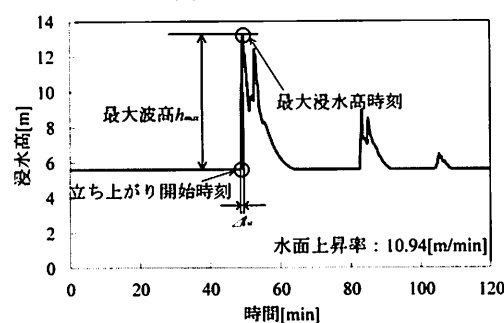
(d) 無被害橋梁(岩手県久慈市長内町)



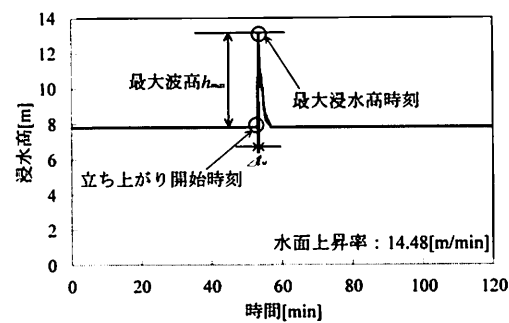
(e) 片岸大橋



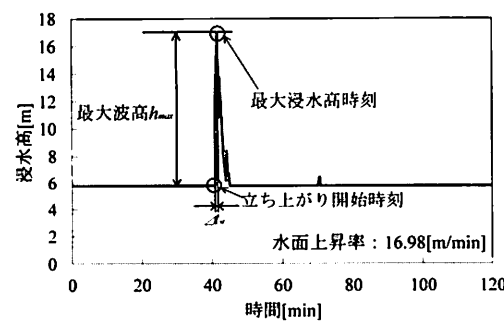
(f) 無被害橋梁(岩手県久慈市長内町)



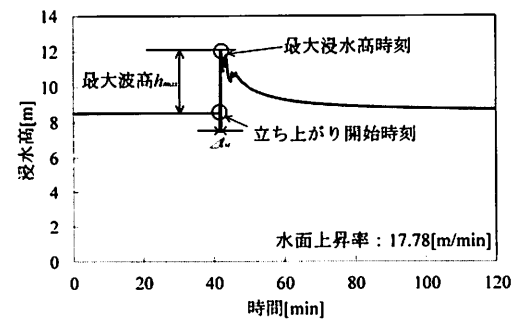
(g) 米田橋



(h) 無被害橋梁(岩手県洋野町種市地区)

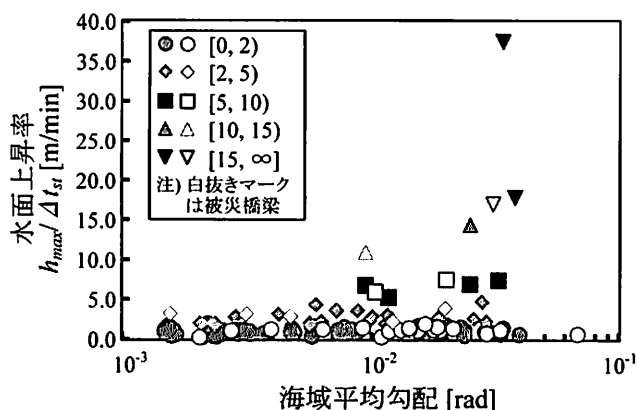


(i) ハイペ沢橋

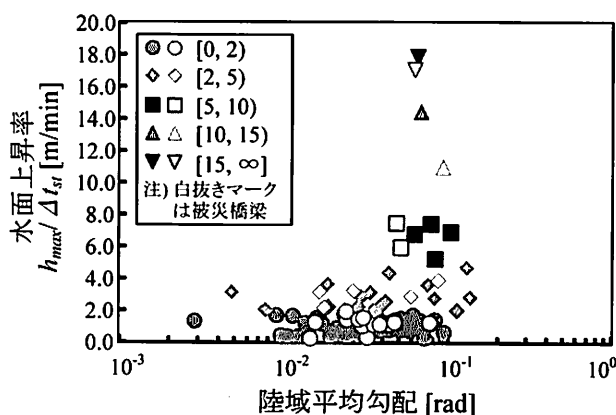


(j) 無被害橋梁(岩手県田野畑村明戸地区)

図-7 代表的な橋梁位置での時系列波形



(a) 水面上昇率と平均海域勾配の関係



(b) 水面上昇率と平均陸域勾配の関係

図-8 水面上昇率と標高勾配の関係

と比較的狭い区間に集中し、その値も0.0090 rad以上と勾配が高くなる。10 m/min以上15 m/min未満の水面上昇率を示す2橋梁でも同様の傾向を示している。さらに15 m/min以上の極めて高い水面上昇率を示す橋梁では、平均海域勾配が0.0309 radから0.0379 radの間の極めて狭い区間に集中し、かつ0.0300 rad以上の極めて高い平均海域勾配を示している。これらの結果から水面上昇率が5 m/min以上となる津波の発生する条件として、平均海域勾配がおおよそ0.01(1/100) rad以上の必要があり、さらに水面上昇率が15 m/min以上の波が発生するには、平均海域勾配がおおよそ0.03(3/100) rad以上でなければならないことが示唆される。一方、水面上昇率が5 m/min未満の津波については、平均海域勾配がおおよそ0.01 radから0.05 rad以上の間と極めて広い区間に分布していることも大きな特徴である。ただし、以上で論じた水面上昇率の高低は津波波面の形状に大きく起因していると考えられる。さらに、橋梁の位置近傍の地形の起伏という波の入射についての境界条件によっても大きく変化することが考えられるため、以上の2点について今後詳細に検討していく必要がある。

一方、図-8(b)に示すように、平均陸域勾配は0.0028 radから0.1352 radの間の値を示しており、平均海域勾配との関係と同様に平均陸域勾配が大きくなるに従い水面上昇率も大きな値を示す傾向となる。2 m/min未満の水面上昇率を示す橋梁の平均陸域勾配は0.0028 radから0.1123 radの間と広い区間を示し、同様に2 m/min以上5 m/min未満の水面上昇率を示す橋梁でも平均海域勾配は0.0048 radから0.1352 radの間の値を示した。水面上昇率が5 m/min以上10 m/min未満に高まると平均陸域勾配が0.0488 radから0.1026 radの間と狭い区間に集中し、その値もおおよそ0.0500 rad以上と勾配が極めて高くなる。10 m/min以上の水面上昇率を示す橋梁でもこの傾向は同様で、平均陸域勾配が0.0619 radから0.0917 radの間と極めて狭い区間に集中している。これらの結果から水面上昇率が5 m/min以上となる津波の発生する条件として、平均陸域勾配がおおよそ0.05(5/100) rad以上でなければならないことが示唆される。一方、平均海域勾配の場合と同様に水面上昇率が5 m/min未満の津波については、平均陸域勾配が広い区間に分布している。

先述したように、水面上昇率の高低は津波波面の形状に大きく起因しているとともに、橋梁の位置近傍の地形の起伏という波の入射についての境界条件にも極めて影響を受けやすいと推察される。そのため、今後の検討課題として入射波形の空間相関を分析するとともに、陸域における土地利用上の粗度の空間的分布を考慮し、さらには橋梁の位置近傍における標高モデルの再現精度や分解能を向上していく予定である。

4. 結論

東北地方太平洋沖地震において津波作用を受けた桁橋構造の112橋梁を対象に津波シミュレーションを行い、浸水高の時系列波形の類型化を行うとともに、津波伝播における海域勾配及び陸域勾配との関係を分析した。以下に得られた知見を示す。

水面上昇率を基に浸水高の時系列波形の類型化を行った。水面上昇率2.0 m/min未満に83橋梁、2.0 m/min以上5.0 m/min未満に18橋梁、5.0 m/min以上10 m/min未満に6橋梁、10 m/min以上15 m/min未満に2橋梁、15 m/min以上に3橋梁となった。これより、74%の橋梁が2 m/min未満の領域に存在した。

平均海域勾配と水面上昇率の関係については、水面上昇率が5 m/min以上となる津波が発生する条件として、平均海域勾配がおおよそ0.01(1/100) rad以上の必要があり、さらに水面上昇率が15 m/min以上の波

が発生するには、平均海域勾配がおおよそ0.03(3/100) rad以上でなければならないことが示唆された。一方、水面上昇率が5 m/min未満の津波については、平均海域勾配がおおよそ0.01 radから0.05 rad以上の間と極めて広い区間に分布した。平均陸域勾配と水面上昇率の関係については、水面上昇率が5 m/min以上となる津波が発生する条件として、平均陸域勾配がおおよそ0.05(5/100) rad以上でなければならないことが示唆された。また、平均海域勾配の場合と同様に水面上昇率が5 m/min未満の津波については、平均陸域勾配が広い区間に分布した。

謝辞：本研究で使用した数値計算については東北大学により開発されたプログラムを利用させて頂きました。同大学の今村文彦先生及び越村俊一先生には貴重なご助言を多々頂きました。同数値計算の実行に際して筑波大学の石川尚樹氏及び元筑波大学の高橋宏允氏にご協力頂きました。また、防衛大学校の嶋原良典先生には有用な助言を多々頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 例えば、片岡正次郎：構造物に対する津波作用の研究と今後の展望 東日本大震災報告会～震災から2年を経て～、国土交通省 国土技術総合研究所、<http://www.nilim.go.jp/lab/bbg/saigai/h23tohoku/houkoku3/happyou/130319-04.pdf>
- 河合弘泰，佐藤真，川口浩二，関克己：GPS波浪計で捉えた平成23年東北地方太平洋沖地震津波，土木学会論文集B2(海岸工学)，Vol.67，No.2，pp.1_1291-1_1295，2011.
- Fujii, Y., Satake, K., Sakai, S., Shinohara, M. and Kanazawa, T.: Tsunami source of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, *Earth Planets Space*, Vol. 63, pp.815-820, 2011.
- 今村文彦，越村俊一，馬淵幸雄，大家隆行，岡田清宏：東北地方太平洋沖地震を対象とした津波シミュレーションの実施 東北大学モデル (version1.2)，東北大学大学院工学研究科附属災害制御研究センター，http://www.tsunami.civil.tohoku.ac.jp/hokusai3/J/events/tohoku_2011/model/dcrc_ver1.2.pdf
- 東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ：痕跡調査結果 20121229版，<http://www.coastal.jp/tjt/>
- 大飼直之，永沢薫：数値計算による東北地方太平洋沖地震津波による岩手県北部での構造物被災状況の把握，土木学会論文集B2(海岸工学)，Vol.68，No.2，pp.1_306-1_310，2012.
- 米山望，森信人，三輪真揮：2011年東北地方太平洋沖地震津波の釜石湾における挙動の数値解析，土木学会論文集B2(海岸工学)，Vol.68，No.2，pp.1_161-1_165，2012.
- 齋藤正文，高橋智幸，岩間賢一，岩寄 隼人：東北地方太平洋沖地震津波による牡鹿半島地方港湾の被害，土木学会論文集B2(海岸工学)，Vol.68，No.2，pp.1_266-1_270，2012.
- 村嶋陽一，越村俊一，岡秀行，村田泰洋，藤間功司，杉野英治，岩渕洋子：非線形分散波理論モデルによる東北地方太平洋沖地震津波のソリトン分裂の再現，土木学会論文集B2(海岸工学)，Vol.68，No.2，pp.1_206-1_210，2012.
- 佐藤慎司，Yeh, H., 磯部雅彦，水橋光希，相澤広志，芦野英明：福島県中部沿岸における2011年東北地方太平洋沖地震津波の挙動，土木学会論文集B2(海岸工学)，Vol.68，No.2，pp.1_346-1_350，2012.
- 信岡尚道，鶴崎賢一，伊藤広樹，坪井拓夢：2011年東北地方太平洋沖地震津波の数値再現に基づく茨城県沿岸の津波ハザード，土木学会論文集B2(海岸工学)，Vol.68，No.2，pp.1_296-1_300，2012.
- 林里美，越村俊一：映像解析による2011年東北地方太平洋沖地震津波の流速測定，土木学会論文集B2(海岸工学)，Vol.68，No.2，pp.1_366-1_370，2012.
- 久木田駿一，柴山知也：東北地方太平洋沖地震津波における津波襲来時の映像の解析と津波の数値計算，土木学会論文集B3(海洋開発)，Vol.68，No.2，pp.1_49-1_54，2012.
- 茅根康佑，田中仁，Adityawan, M. B.：津波の河川遡上に対する河床勾配の影響に関する検討，土木学会論文集B2(海岸工学)，Vol.68，No.2，pp.1_176-1_180，2012.
- 佐々木達生，幸左賢二，鄭玉龍：桁抵抗力津波作用力比に基づく橋梁の被害分析，土木学会構造工学論文集，Vol.59A，pp.417-427,2013.
- 庄司学，中村友治，高橋和慎，櫻井俊彰：2011年東北地方太平洋沖地震において津波作用を受けた道路構造物の被害，土木学会論文集A1 (構造・地震工学)，Vol.68，No.4，pp.1_1300-1306，2012.
- 全国港湾海洋波浪情報網 NOWPHAS：東北地方太平洋沖地震による津波観測データ，<http://nowphas.mlit.go.jp/nowphasdata/sub300.html>
- 国土地理院：10万分1浸水範囲概況図，<http://www.gsi.go.jp/kikaku/kikaku60003>
- Disaster Control Research Center (DCRC), Tohoku University: TUNAMI-CODE Tohoku University's Numerical Analysis Model for Investigation of tsunami, 2009.

- 20) Okada, Y.: Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.75, pp.1135-1154, 1985.
- 21) 土木学会原子力土木委員会津波評価部会：津波評価手法の高精度化研究，土木学会論文集B，Vol.63, No.2, pp.168-177, 2007.
- 22) 相田勇：東海道沖におこった歴史津波の数値実験，地震研究所集報，Vol.56, pp.367-390.
- 23) 国土交通省水管理・国土保全局海岸室，国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部海岸研究室：津波浸水想定の設定の手引きVer.2.00，2012.